

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.006

模糊测度理论在大坝安全智能决策支持系统中的应用

何勇军^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所,江苏 南京 210029;2. 水利部大坝安全管理中心,江苏 南京 210029)

摘要:由于大坝安全性态综合评价是一个多层次、多指标的复杂分析评价问题,既要考虑单个测点、单个项目反映的大坝局部安全性态,更要考虑大坝多个测点、多个项目反映的大坝整体安全性态,为此提出了安全评价集的表示方法.通过对安全评价判据的分析,结合模糊集理论,研究了大坝安全评价判据的表示方法、结论表达,以及综合评价等不确定因素的处理方法,应用模糊集理论对大坝的安全状况作出评价,建立了大坝安全综合评价模型.应用实例表明,该模型是可行的.

关键词:大坝安全;决策支持系统;模糊测度;模糊积分;综合评价

中图分类号:TV642 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2008)05-0605-05

在大坝安全智能决策支持系统(DSIDSS)中,应用实测数据对大坝安全性态作出评价判断是一项重要内容.在安全评价过程中,无论是判据的选取、数据与判据的比较所反映的安全程度,以及对安全程度的表达方式上都存在着某些不确定因素.合理处理这些不确定因素是大坝安全性态综合评价的关键.大坝安全性态综合评价是一个多层次、多指标的复杂分析评价问题,既要考虑单个测点、单个项目反映的大坝局部安全性态,更要考虑大坝多个测点、多个项目反映的大坝整体安全性态.因此,如何处理综合评价过程中的不确定因素是不可回避的问题.

在评价大坝的安全水平或等级时,专家常用‘正常’或‘安全’、“基本正常”或‘基本安全’、“异常”或‘病坝’以及‘险情’或‘险坝’等不确定性的语言表达,这是因为安全和不安全是相对的,两者之间具有模糊性.为了尽可能客观地评价大坝的安全状况,本文结合模糊集理论,研究了大坝安全评价判据的表示方法、结论表达,以及综合评价等不确定因素的处理方法,应用模糊集理论对大坝的安全状况作出评价.

1 安全等级划分

进行大坝安全性态综合评价时,必须给出大坝安全性态结论,这就需要对大坝安全等级进行合理划分.大坝安全等级的划分需要综合考虑,若等级划分得过少,将不利于大坝安全性态的真实合理反映;若等级划分过多,又会使确定等级间界限的难度和计算量加大.通过对已有的大坝安全等级的划分方法^[1-2]、相应的规程规范^[3-4]、有关研究成果^[5-8]以及专家的经验等的综合分析,认为将大坝安全性态综合评价中的安全等级确定为 4 级比较合理.它们构成的安全评价集为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{险情或险坝, 异常或病坝, 基本正常, 正常}\} \quad (1)$$

采用模糊集方法进行大坝安全性态综合评价时,所得结果是对应于各安全等级的隶属度,然后按照最大隶属度原则或综合评分法确定大坝的安全等级.为了建立安全评价集与评价指标量之间的联系,采用如下的隶属度区间表示:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{[0, 0.25], (0.25, 0.5], (0.5, 0.75], (0.75, 1.0]\} \quad (2)$$

2 判据的表示

大坝安全评价判据或界限的确定是一个相当复杂的问题.在实际应用中,通常依据实测资料分解成几个

收稿日期:2008-05-12

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAC14B05)

作者简介:何勇军(1963—),男,辽宁海城人,高级工程师,博士,主要从事大坝安全监测与大坝安全管理研究.

方面:(a)各种规程规范和研究成果;(b)模型试验结果;(c)同类工程的类比;(d)专家经验.仅依靠 1 个依据有其局限性,需要将这些实测资料进行一定的综合.如某水库混凝土重力坝 6 号坝段,在 1 963 m 就不安全,这显然有其局限性.因而,不能只取 1 个数值作为安全与否的判别标准.

高程的设计破坏挠度水平变形值为 15.20 mm.如果认定观测值为 15.10 mm 时,大坝安全 而 15.30 mm 时,为了定量描述大坝各部位的安全程度,定义 1 个函数 $S(x)$ 来反映观测数据或预测值相对于安全等级的隶属度.

定义 称函数 $S(x)$ 为安全程度指数.如果 $S(x)$ 是观测数据 x 的单调函数,并且在 $[0,1]$ 之间取值.

$S(x)$ 可根据不同测点的具体情况取不同的函数形式.在某水库安全评价系统中,采用了如图 1 所示的安全程度指数形式.

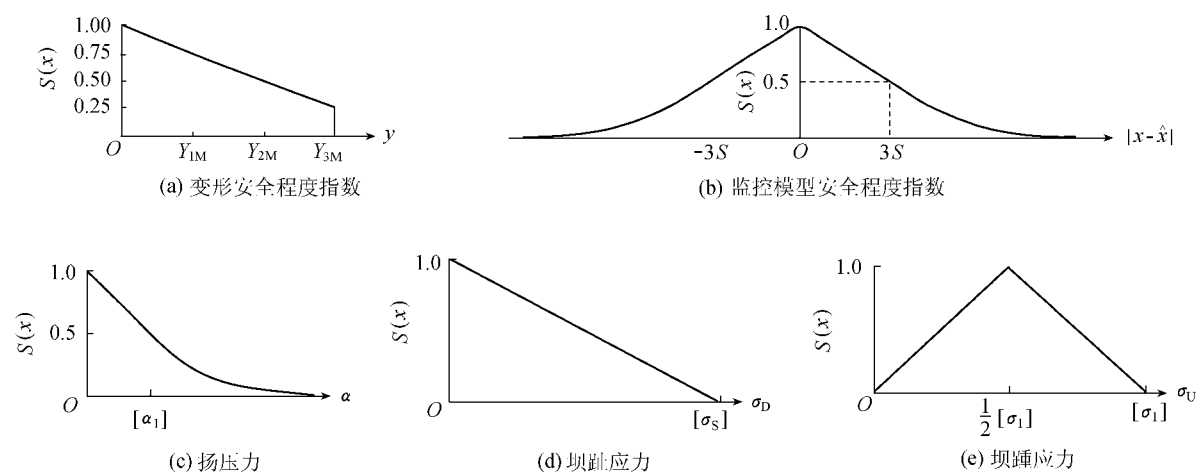


图 1 安全程度指数示意图

Fig.1 Sketches of safety indices

a. 变形评价判据(图 1(a)).

$$S(y) = \begin{cases} 1 - 0.25y/Y_{1M} & (y \leq Y_{1M}) \\ 0.75 - 0.25(y - Y_{1M})/(Y_{2M} - Y_{1M}) & (Y_{1M} \leq y \leq Y_{2M}) \\ 0.50 - 0.25(y - Y_{2M})/(Y_{3M} - Y_{2M}) & (Y_{2M} \leq y \leq Y_{3M}) \\ 0 & (y > Y_{3M}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Y_{1M} ——规范法或黏弹性理论拟定的监控指标; Y_{2M} ——小变形的黏弹塑性理论计算极限状态时的监控指标; Y_{3M} ——失稳破坏阶段确定的监控指标; y ——实测变形值.

b. 监控模型评价判据(图 1(b)).

$$S(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{6S}|x - \hat{x}| & (|x - \hat{x}| \leq 3S) \\ \frac{1}{1 + e^{|x - \hat{x}| - 3S}} & (|x - \hat{x}| > 3S) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{x}$ ——监控模型计算值; S ——监控模型的剩余标准差; x ——实测值.

c. 扬压力评价判据(图 1(c)).

$$S(\alpha) = \begin{cases} 1 - \frac{0.5\alpha}{[\alpha_1]} & (\alpha < [\alpha_1]) \\ \frac{1}{1 + e^{\alpha - [\alpha_1]}} & (\alpha \geq [\alpha_1]) \end{cases} \quad (5)$$
$$\alpha = \frac{H - H_2}{H_1 - H_2}$$

式中: $[\alpha_1]$ ——设计采用的允许渗压系数,帷幕后取为 0.50,排水孔前取为 0.25; α ——实测渗压系数; H ——测压管水位; H_1 ——上游水位; H_2 ——下游水位.

d. 应力评价判据.

坝趾(图 1(d))：
$$S(\sigma_D) = 1 - \frac{\sigma_D}{[\sigma_S]} \tag{6}$$

式中： $[\sigma_S]$ ——标准试件和龄期的抗压强度 σ_S 除以 2.5 的安全系数； σ_D ——实测坝趾压应力。

坝踵(图 1(e))：
$$S(\sigma_U) = \begin{cases} \frac{2\sigma_U}{[\sigma_t]} & (0 < \sigma_U \leq \frac{1}{2} [\sigma_t]) \\ 2 - \frac{2\sigma_U}{[\sigma_t]} & (\frac{1}{2} [\sigma_t] \leq \sigma_U < [\sigma_t]) \\ 0 & (\sigma_U \leq 0 \text{ 或 } \sigma_U \geq [\sigma_t]) \end{cases} \tag{7}$$

式中： $[\sigma_t]$ ——标准试件和龄期的抗压强度 σ_t 除以 2.5 的安全系数； σ_U ——实测坝踵压应力。

监控指标的拟定方法见文献[2]。评价时,应用各测点的实测数据或由监控模型得到的预测数据,由安全程度指数函数可计算出各单测点相对于各安全等级的隶属度,然后应用模糊测度与模糊积分理论进行单项目评价和综合评价。

3 综合评价中不确定因素处理方法

大坝多个监测项目、多个测点的监测数据反映了大坝整体安全性态。因此,在得到单因素评价的结果后,应对大坝整体安全性态进行综合评价,这是一个多层次的分析过程。

综合评价过程为:(a)应用各测点的实测数据或由监控模型得到的预测数据,由安全程度指数函数计算出单测点相对于各安全等级的隶属度。(b)应用模糊测度和模糊积分理论求出单项目评价。(c)根据单项目评价结果进行大坝安全性态的总体评价。

根据大坝上布设的各监测点的实测数据或预报数据,可得到其相对于安全指标的安全程度(相对于安全的隶属度)。显然,对大坝整体安全性态进行综合评价时,不同的大坝,或者同一大坝,各监测点的作用也不同。

3.1 模糊测度与模糊积分^[9-11]

模糊测度理论(fuzzy measures theory)是模糊数学理论中的一个重要内容,其在工程应用中取得了成效。

定义 在论域 Ω 中的单调类 K 上的集函数 $g(\cdot)$ 称为模糊测度,如果它满足条件：

- a. $g(\varphi) = 0, g(\Omega) = 1$ ；
- b. 若 $F, F_1 \in K, F \subset F_1$, 则有 $g(F) \leq g(F_1)$ ；
- c. 若 $F_n \uparrow F$, 且 $\{F_n\}_{n=1}^\infty \subset K$, 则有 $\lim_{n \rightarrow \infty} g(F_n) = g(F)$ 。

上述定义是模糊测度的最基本定义,建立在模糊集理论基础之上。为了将这种抽象的理论通俗化,本文结合大坝安全评价问题进行叙述。

在几何学中,直线、曲线和曲面等都可以视为由点构成的点集。在研究和讨论大坝安全性态综合评价过程中,各监测点的效应量(如变形、渗流、应力、应变等)是重点研究对象,而这些点就构成了集合。由于大坝结构的复杂性、影响因素的不确定性等客观因素的存在,可将其视为模糊集合(非模糊集合均可视为模糊集合的特殊情况),从而可利用模糊集和模糊测度理论进行研究和分析。

设 (Ω, Γ, g) 是模糊测度空间, $f: \Omega \rightarrow [0, 1]$ 是 Ω 上的可测函数, $a \in \Gamma$ 。 f 在 A 上关于 g 的模糊积分定义为

$$\mu = \oint f(x) \circ g(\cdot) = \sup_{\lambda \in [0, 1]} (\lambda \wedge g(A \cap f_\lambda)) \tag{8}$$
$$f_\lambda = \{x | f(x) \geq \lambda\} \quad (0 \leq \lambda \leq 1)$$

式中： f_λ —— λ 水平截集,随着 λ 的增加而减小； μ ——模糊集的隶属函数 f 与模糊测度 g 的一种广义内积,反映了主体对客体各因素的隶属度与重视度(模糊测度 g)之间的相容程度, μ 值越大,表示客体的特征同主体对它的要求越接近。

当 $A = \Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 且 $f(x_1) \geq f(x_2) \geq \dots \geq f(x_m)$ 时,记 $\{f(x_i)\}_{i=1}^n$, 则模糊积分式可写为

$$\mu = \oint f(x) \circ g(\cdot) = \bigvee_{j=1}^m (f(x_j) \wedge g(A_j)) \tag{9}$$

若取模糊测度 g 为 λ 一模糊测量 g_λ , 则有

$$\mu = \oint f(x) \circ g(\cdot) = \bigvee_{j=1}^m (f(x_j) \wedge G(x_j))$$

(10)

式中 $f(x_j)$ 和 $G(x_j)$ 都是单调函数,其中 $G(x_j)$ 为模糊分布函数,它表示 $g(x_j)$ 的分布状况, $G(x_j)$ 与 $g(x_j)$ 的关系满足

$$G(x_1) = g(x_1) \quad G(x_j) = G(x_{j-1}) + g(x_j)(1 + \lambda G(x_{j-1})) \quad (2 \leq j \leq m)$$

(11)

当 $\lambda = 0$ (表示满足简单可加性)时,有

$$G(x_1) = g(x_1) \quad G(x_j) = G(x_{j-1}) + g(x_j) \quad (2 \leq j \leq m)$$

(12)

3.2 大坝安全性态综合评价模型

设 Ω 为待评判的某一客体,本文为大坝,它具有参加评价的指标因素(各安全监测效应): $x_1, x_2, \cdots, x_m$. 对于 Ω 的每一个子集 A ,都对应地赋予一个介于 0 与 1 之间的实数 $g(A)$,它是 Ω 凭借 A 中指标因素所能得分的最高限额,可以用来描述因素集合 A 的重要性.显然, g 满足:(a) $g(\varphi) = 0, g(\Omega) = 1$; (b) 若 $A \subset B \subset \Omega$, 则 $g(A) \leq g(B)$. 由于 Ω 仅含有有限个指标因素,因此 g 自然为 (Ω, D) 上的模糊测度,称之为重要性测度.

重要性测度是评价各因素贡献大小的数量化指标.评价过程中,先得出每个因素 x_i 的评分(即隶属度) $f(x_i) \in [0, 1] (i = 1, 2, \cdots, m)$,则客体 Ω 的综合评价值为

$$\mu = \oint f(x) \circ g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^m (f^{(i)} \wedge g(A^{(i)}))$$

(13)

式中 $f^{(i)}$ 为 $\{f(x_l)\}_{l=1}^m$ 按从大到小顺序重排后的第 i 个, $\{x_l\}_{l=1}^m$ 为 $A^{(i)} = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(i)}\}$ 按相应顺序重排后的前 i 个.实质上, μ 便是隶属度函数关于重要性测度的模糊积分.

根据大坝安全监测数据,按本文评价指标度量方法,分别计算出相对于评价指标的各隶属度为 $f(x_l) (l = 1, 2, \cdots, m)$,取各评价指标的重要程度作为模糊测度 $g(x_l) (l = 1, 2, \cdots, m)$. 由于在模糊积分中要求 $f(x_l)$ 为单调函数,在进行综合评价前,应先将 $f(x_l) (l = 1, 2, \cdots, m)$ 按由大到小的顺序排列为 $f(x^{(1)}), f(x^{(2)}), \cdots, f(x^{(m)})$,并相应地排列 $\{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$ 为 $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(m)}\}$,再将对应的模糊测度 $g(x^{(i)}) (i = 1, 2, \cdots, m)$ 进行归一化处理.

4 应用实例

某水库大坝为混凝土重力坝.为监测大坝安全,该坝在坝体、坝基各部位分别设置了变形(水平位移、垂直位移、倾斜、裂缝)、渗流(坝基扬压力、渗流量、绕坝渗流)、应力应变(基岩变位、坝踵及坝趾应力、局部应力、温度)及上游松动体(锚索测力计)等监测项目.本文以该坝的安全性态综合评价过程为例进行说明.

根据本文介绍的方法,以及各测点的监测数据,结合大坝安全性态监控指标和各自的隶属度函数,计算出定量评价价值(相对于安全等级的隶属度) $f(x_{ij}) (l = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$ 再根据坝工理论和设计资料,确定各因子对于大坝整体安全性态综合评价的重要程度 $g(x_{ij})$,然后应用式(10)、式(12)计算出大坝安全性态评价结果,计算结果见表 1~4.

表 1 排水幕处各项段渗流压力单因素评价

Table 1 Single factor evaluation of infiltration pressures in drainage curtains at each dam block

坝段	α_i	$f(\alpha_i)$	$g(\alpha_i)$	$f(\alpha^{(i)})$	$g(\alpha^{(i)})$	$G(\alpha^{(i)})$
1 号	0.270	0	0.30	0.86	0.35	0.057
2 号	0.052	0.86	0.35	0.85	1.00	0.221
3 号	0.152	0.64	0.50	0.82	0.90	0.369
4 号	0.077	0.82	0.90	0.80	1.00	0.533
5 号	0.062	0.85	1.00	0.68	0.90	0.680
6 号	0.082	0.80	1.00	0.64	0.50	0.762
7 号	0.132	0.68	0.90	0.41	0.35	0.820
8 号	0.315	0	0.50	0	0.50	0.902
9 号	0.245	0.41	0.35	0	0.30	0.951
10 号	0.607	0	0.30	0	0.30	1.000

注: $\mu(\alpha)$ 为 0.68.

表 2 单项目评价因素的隶属度及模糊测度

Table 2 Membership degrees and fuzzy measures of single item evaluation factors

评判因素	变形				渗流			应力应变	
	水平位移	垂直位移	倾斜	裂缝	扬压力	渗流量	绕坝渗流	应力	温度
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{31}	x_{32}
$f(x_{ij})$	0.81	0.82	0.74	0.72	0.69	0.71	0.70	0.79	0.86
$g(x_{ij})$	0.85	0.85	0.90	0.80	0.90	0.90	0.80	0.75	0.70

首先进行单因素评价,表 1 为渗流压力单因素评价结果.表 2、表 3 为单项目计算结果.其中表 3 中 $\mu(x_i)$ 变形时为 0.74,渗流时为 0.69,应力应变时为 0.79.与式(1),(2)对比,得出变形、渗流、应力应变的测值反映出大坝安全‘基本正常或正常’的结论.

表 3 单项目评价结果

Table 3 Results of single item evaluation

评判因素	变形				渗流			应力应变		
	$x_i^{(j)}$	$x_1^{(1)}$	$x_1^{(2)}$	$x_1^{(3)}$	$x_1^{(4)}$	$x_2^{(1)}$	$x_2^{(2)}$	$x_2^{(3)}$	$x_3^{(1)}$	$x_3^{(2)}$
	x_{ij}	x_{12}	x_{11}	x_{13}	x_{14}	x_{22}	x_{23}	x_{21}	x_{32}	x_{31}
	$f(x_i^{(j)})$	0.82	0.81	0.74	0.72	0.71	0.70	0.69	0.86	0.79
$g(x_i^{(j)})$	0.85	0.85	0.90	0.90	0.80	0.90	0.80	0.90	0.70	0.75
$G(x_i^{(j)})$	0.25	0.50	0.76	1.00	0.35	0.65	1.00	0.48	1.00	

根据单项目评价结果进行大坝整体运行安全性态综合评价,表 4 为计算结果.与式(1),(2)对比,得出大坝安全性态‘基本正常’的结论.但存在几个疑点:(a)1 号,8 号,9 号和 10 号坝段渗压系数偏高;(b)库水位上升时,坝踵压应力应减小,但 5 号坝段反而增加 0.14 MPa,变化不合理,应进行成因分析.

5 结 语

- a. 大坝安全性态的综合评价是一个多层次、多指标的复杂分析评价问题,既要考虑单个测点、单个项目反映的大坝局部性态,更要考虑大坝多个测点、多个项目反映出的大坝整体安全性态.为此,本文提出了安全评价集的表示方法.通过对安全评价判据的分析,提出了大坝安全智能决策支持系统中安全评价判据的表示及评价方法,以便于计算机表示和处理.
- b. 应用模糊测度和模糊积分理论,建立了大坝安全综合评价模型,应用实例表明,该模型是可行的.

参考文献:

[1] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.

[2] 吴中如,顾冲时.大坝安全综合评价专家系统[M].北京:北京科学技术出版社,1997.

[3] DLT5178—2003,混凝土大坝安全监测技术规范[S].

[4] SL60—94,土石坝安全监测技术规范[S].

[5] 吴中如,顾冲时,沈振中,等.大坝安全综合分析和评价理论、方法及其应用[J].水利水电科技进步,1998,18(3):2-6.

[6] 徐洪钟,胡群革,吴中如.自适应模糊神经网络在大坝安全监控中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(2):3-10.

[7] 张乾飞,王锦国,李雪红.大坝安全监控中的不确定性信息初探[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):113-117.

[8] 聂学军,顾冲时,严良平,等.自适应模糊系统在大坝安全监测故障诊断中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):395-398.

[9] 张广全.模糊值测度论[M].北京:清华大学出版社,1998.

[10] 哈明虎,吴从炘.模糊测度与模糊积分理论[M].北京:科学出版社,1998.

[11] WANG Zheng-yuan,KLIR G J.Fuzzy measure theory[M].New York:Plenum Press,1992.

Application of fuzzy measure theory in DSIDSS

HE Yong-jun^{1,2}

- (1. Dam Safety and Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China ;
2. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract : Comprehensive evaluation of dam safety is a complex multi-hierarchy and multi-index evaluation problem. Not only the local safety behavior based on a single measurement point and a single item but the entirety safety behavior based on multiple measurement points and multiple items should be considered. Based on the safety evaluation criterion analysis and fuzzy set theory, the representation methods of dam safety criteria and treatment methods of uncertain factors are studied. The dam safety comprehensive evaluation model is established using the fuzzy measure and fuzzy integration theories. An application shows that it is practical and effective.

Key words : dam safety ; decision support system ; fuzzy measure ; fuzzy integration ; comprehensive evaluation